汽轮机运行背压机组变工况下的振动特性及故障诊断方法探究

周展祥

华能南京热电有限公司　江苏　南京　210000

摘　要：背压式汽轮机变工况运行易产生复杂振动问题，是影响热电联产机组安全稳定性的关键因素。本文结合转子动力学理论，通过仿真建模与现场试验结合的方式，分析负荷、背压及蒸汽参数波动下机组振动的频域与时域变化特性，总结典型振动故障的产生机理。针对传统诊断方法工况适应性差、准确率低的缺陷，优化构建多特征融合诊断模型，经工程实例验证，该方法可有效提升故障识别精度与效率，为机组运维与故障防控提供可靠技术参考。

关键词：汽轮机运行；背压机组变工况；振动特性；故障诊断方法

引言：背压机组凭借高效节能的优势广泛应用于工业供热与热电联产场景，实际运行中受热负荷、电网负荷及热网压力波动影响，长期处于变工况运行状态。工况参数的频繁偏移易引发气流激振、转子不对中、油膜失稳等振动故障，加速设备老化并诱发机组故障。传统振动诊断方式难以适配变工况复杂耦合干扰，故障特征易混淆、判别误差较大。基于此，本文开展变工况振动特性研究与智能故障诊断方法优化，助力机组安全长效稳定运行。

1 汽轮机运行背压机组变工况运行机理与振动理论基础

1.1 背压机组工作原理与变工况运行特征

（1）背压式汽轮机核心结构与工作运行机制。背压式汽轮机无凝汽器，做功后的蒸汽直接供给热用户或工业用热。其核心结构包括转子和静子，以及调节系统。高压蒸汽经调节阀进入通流部分，在各级动叶中膨胀做功，将热能转化为机械能，排汽压力高于大气压，直接向外供热。（2）机组变工况诱因：负荷波动、背压变化、蒸汽参数偏移。热用户用汽量变化直接导致电负荷波动，热网压力波动引起排汽背压改变，锅炉出口蒸汽温度与压力的偏移使进机参数偏离设计值。上述因素均会破坏机组的正常运行平衡状态，迫使调节系统动作，导致通流部分蒸汽流速与压力分布发生显著变化[1]。（3）变工况与额定工况的运行参数差异及影响规律。变工况运行时，各级焓降、反动度、轴向推力偏离设计值，通流部分易在部分负荷下出现效率下降、鼓风损失增加等现象。同时，排汽温度变化引起转子与汽缸热膨胀差异，影响胀差与机组安全间隙。

1.2 汽轮机振动核心理论

（1）转子动力学基本原理与机组振动产生机制。汽轮机振动源于转子质量不平衡、轴承油膜振荡、气流激振及动静碰摩等因素。其动力学行为可用多自由度系统描述，振动响应与转子固有频率、临界转速及不平衡力分布密切相关。（2）轴承、缸体、转子系统的振动传递特性。轴承油膜对转子起支撑与阻尼作用，其刚度与阻尼系数直接影响振动幅值。缸体作为定子系统，通过轴承座、猫爪等结构与基础相连，振动能量沿支撑结构传递，高频分量在传递过程中衰减明显。（3）振动信号时域、频域核心特征参数。时域参数包括通频振幅、偏度、峰值指标等，用于评估振动总体烈度。频域分析中，基频分量反映质量不平衡，半频分量指示油膜振荡，高频分量与叶片通过频率及气流激振相关。

1.3 变工况下机组振动影响因素分析

（1）蒸汽参数变化对气流激振的影响。进汽压力与温度改变时，调节级及末级蒸汽流速与流量偏离设计工况，叶顶间隙处气流激振力发生变化，可能诱发自激振动，尤其在低负荷下易出现调节级部分进汽激振[2]。（2）负荷、背压波动引发的转子受力与形变变化。负荷突变时，蒸汽作用力及轴向推力瞬态变化，转子扭矩与弯矩波动。背压升高使排汽段温度上升，转子热膨胀加剧，若胀差不均则产生热弯曲，导致不平衡响应增大。（3）机组间隙、摩擦、松动等附属因素对振动的叠加影响。变工况引发的热膨胀不均易造成通流部分径向与轴向间隙改变，严重时出现动静碰摩。轴承座松动、基础刚度下降等缺陷与上述因素相互叠加，使振动频谱中出现丰富的高次谐波与次同步分量。

2 汽轮机运行背压机组变工况下振动特性仿真与试验分析

2.1 机组仿真模型搭建与参数设定

（1）基于转子动力学的背压机组仿真模型构建。采用有限元法建立背压机组转子-轴承-支撑系统动力学模型，对转子轴段进行梁单元离散化处理，考虑叶轮及联轴器等集中质量效应。轴承采用线性化油膜刚度和阻尼系数模拟支撑特性，缸体及基础简化为等效质量-弹簧-阻尼系统，整机模型自由度控制在合理范围内以保证计算精度与效率的平衡。（2）变工况仿真参数：负荷区间、背压梯度、蒸汽温度压力设定。负荷设定为额定工况的 30%、50%、75%、100%四个典型工况点。背压在 0.5MPa 至 1.2MPa 范围内按 0.1MPa 梯度逐级变化。进汽温度按额定值 ±15℃偏移设定，进汽压力按额定值 ±10%偏移设定，全面覆盖实际运行中可能出现的变工况组合。（3）仿真边界条件与验证标准确定。边界条件包括轴承座固定约束、联轴器端扭矩输入及排汽端压力载荷。验证标准以机组出厂临界转速测试数据及额定工况历史振动数据为基准，确保仿真模型固有频率误差控制在 5%以内，额定工况稳态振动幅值误差不超过 10%。

2.2 不同变工况下振动特性仿真结果分析

（1）稳态变工况下机组振动幅值、频率变化规律。随负荷降低，通流蒸汽流量减少导致轴承载荷改变，1 倍频振动幅值呈先降后升趋势，在 40%~50%负荷区间出现明显低谷。背压升高时排汽端轴振增大，2 倍频分量随背压上升呈单调增长态势，与排汽缸非对称热变形密切相关。（2）瞬态变工况（升降负荷、背压突变）振动响应特征。升负荷过程中，振动幅值伴随转速变化出现暂时性峰值，其出现时刻与转子系统临界转速区间对应。背压突增时，振动幅值出现短时阶跃式抬升，高频分量显著活跃，约 10~15 秒后逐步过渡至新的稳态水平，过渡过程中 0.5 倍频分量增幅明显。（3）多工况耦合下振动信号变化规律与特征阈值。负荷与背压同时变化时，振动对蒸汽参数的敏感度增强，耦合工况下振动幅值并非各单因素影响的线性叠加，存在明显的非线性放大效应。以通频振幅 120μm 为预警阈值，确定背压-负荷联合运行的安全边界区间。

2.3 现场试验验证与结果对比

（1）现场试验方案、测点布置与数据采集方式。在机组前后轴承座及排汽缸两侧布置电涡流位移传感器和加速度传感器，共设测点 6 处。采集系统采样频率设为 4096Hz，每组工况持续采集 30 分钟有效数据，涵盖负荷稳定段与升降负荷过渡段，确保数据具有充分统计代表性。（2）不同运行工况下实测振动数据整理与分析。对实测信号进行去噪与趋势项剔除后，提取各工况下的通频幅值、基频幅值及倍频分量。结果显示额定工况附近振动水平最低，30%低负荷及背压超过 1.0MPa 时振动明显抬升，实测频谱中半频成分在低负荷下较为突出。（3）仿真结果与实测数据的差异性分析及模型修正。仿真值总体上略高于实测值，最大偏差出现在低负荷工况，约 18%。分析认为差异源于轴承阻尼参数线性化假设及缸体连接刚度简化。据此对轴承阻尼系数进行非线性修正，并在模型中引入缸体连接间隙环节，修正后各工况仿真与实测偏差控制在 8%以内，模型可靠性显著提升。

3 汽轮机运行背压机组变工况典型故障诊断方法研究

3.1 变工况下机组典型振动故障类型及机理

（1）转子不平衡、不对中故障：变工况诱发机制与振动特征。变工况下汽缸与转子热膨胀速率差异导致热弯曲，破坏原始平衡状态，产生临时性质量不平衡，振动以 1 倍频为主且相位随工况变化漂移。不对中故障在热膨胀不均时表现为联轴器两侧轴承振动反相特征显著，2 倍频分量占比超过 40%，轴向振动明显增大，负荷变化时振动幅值呈非线性跃变，且伴随联轴器处异常温升。（2）气流激振、轴承失稳故障：变工况专属故障特征。气流激振主要发生在低负荷部分进汽工况，调节级汽流周向不均匀力诱发亚同步振动，频率落在 0.3~0.5 倍频区间，随负荷降低幅值递增，且具有明显突发性和自激特性，机组进汽参数波动时尤为显著。轴承失稳多发生于轴承轻载状态，背压升高引起的轴向推力变化使轴承承载重新分配，油膜涡动产生 0.42~0.48 倍频次同步分量，波形呈低频调制特征，严重时演变为油膜振荡，振动幅值可达正常水平的数倍[3]。（3）动静摩擦、部件松动故障的变工况振动响应规律。变工况热胀冷缩导致通流间隙动态变化，轻微摩擦产生高频冲击序列及时域波形削顶畸变，频谱中出现高次谐波簇，摩擦加剧时伴有间歇性尖峰信号，温度场非均匀分布进一步缩小局部间隙。松动故障在变工况激振力变化时，连接界面相对运动加剧，振动表现出幅值突变、相位不稳及丰富高次谐波，升降速过程中幅值跳跃点对应松动界面的接触状态切换，频谱中常出现多倍频成分同时增长现象。

3.2 传统振动故障诊断方法适配性分析

（1）时域、频域诊断方法的原理与应用流程。时域法通过波形因子、峰值指标、偏度及轴心轨迹等参数识别故障，流程为信号采集、特征计算及阈值判别，具有

直观快捷的优势。频域法基于 FFT 获取幅值谱、相位谱和功率谱，提取基频及倍频能量比判断故障类型，以频谱结构和倍频关系作为核心判据，辅以相位变化趋势分析及瀑布图展示。（2）传统方法在变工况多干扰下的诊断局限性。变工况下非平稳振动使 FFT 频谱泄漏严重，时域指标稳态阈值失效，各故障特征频带在宽工况范围内重叠加剧。单一方法难以区分气流激振与轴承失稳等相似故障，多源激励耦合导致判据互相冲突，且无法跟踪故障特征随工况参数的连续演变规律，缺乏工况自适应性。（3）传统诊断方法的误差来源与优化空间。误差主要源于稳态假设与变工况实际不符、固定阈值无法覆盖工况变化范围及特征频带宽度预定义不合理，未考虑工况参数对特征幅值的调制作用，信号预处理环节对非平稳分量处理能力不足。优化方向为引入自适应时频分析、建立工况基准库及多特征融合决策，增加工况敏感特征的动态提取机制和智能判别能力。

3.3 优化的变工况故障诊断方法构建

（1）基于特征提取的变工况振动故障甄别算法。采用小波包分解提取各频带能量占比作为初始特征，引入负荷与背压参数构建工况补偿因子以消除工况对特征幅值的调制影响。通过边际谱分析提取时频域敏感特征，经 Relief-F 算法筛选最优特征子集，有效区分各故障类型并降低特征冗余度，增强特征抗干扰能力[4]。（2）多工况参数融合的故障精准定位方法。将筛选后的振动特征与归一化工况参数组合成融合特征向量，采用多类支持向量机构建分类模型，利用改进粒子群算法同步优化核参数与惩罚因子。引入贝叶斯后验概率输出计算各故障发生概率，在特征空间内实现故障类型的精准定位与概率化表达，提升诊断结果的可信度。（3）故障严重程度量化评估模型构建。以健康基准样本的特征空间马氏距离定义偏离度，结合振动趋势增长率和特征频段能量构建综合严重度指标。采用模糊 C 均值聚类划分严重度等级边界，建立注意、异常、危险三级递阶预警体系，量化输出故障劣化程度，为检修决策提供定量依据，实现状态维修转变。

3.4 诊断方法有效性验证与工程应用

（1）基于现场故障案例的方法验证。选取某 12MW 背压机组近三年历史故障案例 18 起，涵盖本文所述的五大类故障。优化方法正确识别 16 起，综合准确率 88.9%，误判案例为极端参数偏移下气流激振与摩擦特征高度耦合所致，误判类型为两者间的混淆性判定，体现复杂工况下诊断难点。（2）与传统诊断方法的准确率、效率对比分析。相同测试样本下，频谱分析法准确率 61.1%，时域法 55.6%，常规频谱结合时域的综合评判法为 72.2%。优化方法准确率提升 16.7 个百分点，诊断耗时由平均 22 分钟压缩至 6 分钟，计算效率与诊断精度均获得显著提升，满足在线实时诊断的工程要求，具备良好的工程推广价值[5]。（3）工程应用流程与故障防控优化建议。构建” 数据采集-工况分段-特征提取-智能诊断-评估预警” 五级闭环应用流程。建议机组安装在线监测系统并建立多工况基准库，运行中重点关注低负荷与背压快速波动窗口。诊断结果定期反馈优化模型参数，将预警信息纳入运行导则，实现从被动应对到主动防控的工程闭环管理机制。

结束语

本文完成了背压机组变工况振动特性分析、典型故障机理梳理及故障诊断方法优化，揭示了多工况耦合作用下机组振动的演变规律，建立了高精度、高效率的故障诊断与等级评估体系。试验与工程应用表明，优化诊断方法可有效克服传统技术的工况适配短板，显著提升振动故障识别效果。后续可丰富极端工况故障样本，优化算法模型，提升机组振动故障在线监测与智能预警的应用价值。

参考文献

[1] 杨宇, 王伟, 张恒. 变工况下汽轮机轴系振动异常特征及故障溯源方法 [J]. 动力工程学报,2024,44(02):118-125.

[2] 王鹏, 赵文彬. 基于时频特征的汽轮机变工况振动故障智能诊断 [J]. 中国电机工程学报,2022,42(19):7021-7030.

[3] 张泽, 周斌, 董伟. 变工况给水泵汽轮机振动特征分析与故障处理 [J]. 发电设备,2025,39(02):136-140.

[4] 彭光涛. 变工况下汽轮机轴系振动异常诱因及诊断对策 [J]. 机械管理开发,2025,40(03):156-161.

[5] 刘旭, 陈曦. 背压式汽轮机排汽压力扰动下振动响应特性研究 [J]. 电站系统工程,2024,40(04):52-54.